

# Indice

<b>Introduzione</b>	<b>3</b>
Sommario . . . . .	5
<b>1 Concetti generali sui serbatoi geotermici</b>	<b>7</b>
1.1 Circolazione di fluidi in mezzi porosi . . . . .	7
1.1.1 Acquiferi e flusso idrico sotterraneo . . . . .	7
1.1.2 Tipi di permeabilità . . . . .	9
1.1.3 Classificazione degli acquiferi . . . . .	10
1.1.4 Moti di filtrazione - La legge di Darcy . . . . .	10
1.2 Trasporto di massa ed energia in mezzi fratturati e porosi . . . . .	14
1.2.1 Equazioni di bilancio . . . . .	15
1.3 Sistemi idrotermali . . . . .	19
1.3.1 Classificazione dei sistemi idrotermali . . . . .	20
1.3.2 Alterazione idrotermale . . . . .	21
<b>2 Valutazione del potenziale geotermico</b>	<b>23</b>
2.1 Cenni storici e sviluppi attuali . . . . .	23
2.2 Concetti generali . . . . .	24
2.3 Valutazione della risorsa energetica e fasi di un progetto geotermico .	26
2.4 Metodi del primo ordine . . . . .	28
2.4.1 Metodo del flusso termico superficiale (surface heat flux) . . .	28
2.4.2 Metodo volumetrico (volume methods) o metodo dello stored heat . . . . .	29
2.4.3 Metodo della frattura piana (planar fracture method) . . . .	31
2.4.4 Metodo del budget termico magmatico (magmatic heat budget)	33
2.4.5 Varianti dei metodi del primo ordine . . . . .	33
2.5 Il fattore di recupero . . . . .	34
2.5.1 Modelli teorici per il fattore di recupero . . . . .	35
2.5.2 Recoverability . . . . .	38
2.6 Valutazione statistica della risorsa geotermica . . . . .	40

2.6.1	Il metodo Monte Carlo . . . . .	40
2.6.2	Applicazione alla ricerca geotermica . . . . .	41
2.7	Metodo Parini-Riedel . . . . .	42
2.7.1	Fasi del metodo . . . . .	43
2.7.2	Parametri chiave (key parameters) del serbatoio . . . . .	44
2.7.3	Criteri di utilizzo della risorsa . . . . .	45
<b>3</b>	<b>Modellistica e simulazione numerica di serbatoi geotermici</b>	<b>47</b>
3.1	Software utilizzato: FEFLOW® . . . . .	47
3.1.1	Equazioni di bilancio . . . . .	48
3.2	Condizioni al contorno, condizioni iniziali e vincoli . . . . .	49
3.2.1	Condizioni iniziali . . . . .	49
3.2.2	Condizioni al contorno . . . . .	50
3.3	Cenni sull'utilizzo del software . . . . .	54
<b>4</b>	<b>Caso studio: Massa Marittima</b>	<b>61</b>
4.1	Descrizione della zona . . . . .	61
4.2	Inquadramento geologico e stratigrafico . . . . .	63
4.3	Inquadramento geotermico . . . . .	67
4.3.1	Campo geotermico di Larderello . . . . .	67
4.4	Precedenti valutazioni del potenziale della zona . . . . .	73
4.4.1	Pozzo ENEL "Massa 2" . . . . .	76
4.5	Applicazione del metodo volumetrico . . . . .	79
4.6	Valutazione statistica . . . . .	86
4.6.1	Dati in ingresso e distribuzioni di probabilità dell'energia . . . . .	87
4.7	Simulazione numerica del serbatoio . . . . .	92
4.7.1	Schematizzazione del problema . . . . .	94
4.7.2	Dati necessari per la simulazione . . . . .	96
4.7.3	Dati disponibili . . . . .	97
4.7.4	Dati mancanti . . . . .	99
4.7.5	Situazioni simulate . . . . .	100
<b>5</b>	<b>Studio sullo sfruttamento della risorsa calda "secca"</b>	<b>105</b>
5.1	Modello fisico-matematico per lo studio della conduzione nel sottosuolo	106
5.1.1	Schematizzazione geometrica del dominio roccioso . . . . .	106
5.1.2	Modello fisico-matematico . . . . .	107
5.1.3	Scambiatore di calore . . . . .	110
5.1.4	Equazioni di bilancio energetico sullo scambiatore . . . . .	111
5.2	Metodo analitico per la risoluzione del problema . . . . .	112
5.2.1	Equazioni integrali di Volterra . . . . .	113

---

5.2.2	Metodo delle approssimazioni successive . . . . .	114
5.2.3	Schema per la risoluzione numerica . . . . .	115
5.3	Problema di riferimento per la validazione dello studio . . . . .	118
5.4	Risoluzione numerica del problema . . . . .	120
5.4.1	Alcune considerazioni sulla scelta dell'errore $\epsilon$ . . . . .	121
5.4.2	Risultati delle simulazioni . . . . .	121
5.5	Discussione dei risultati . . . . .	130
<b>Conclusioni</b>		<b>133</b>
<b>A Stratigrafia della zona di Massa Marittima</b>		<b>135</b>
A.1	Unità litostratigrafiche presenti all'interno dell'area di studio utilizzata ai fini della valutazione della risorsa geotermica . . . . .	135
<b>Bibliografia</b>		<b>140</b>
<b><i>Ringraziamenti</i></b>		<b>145</b>